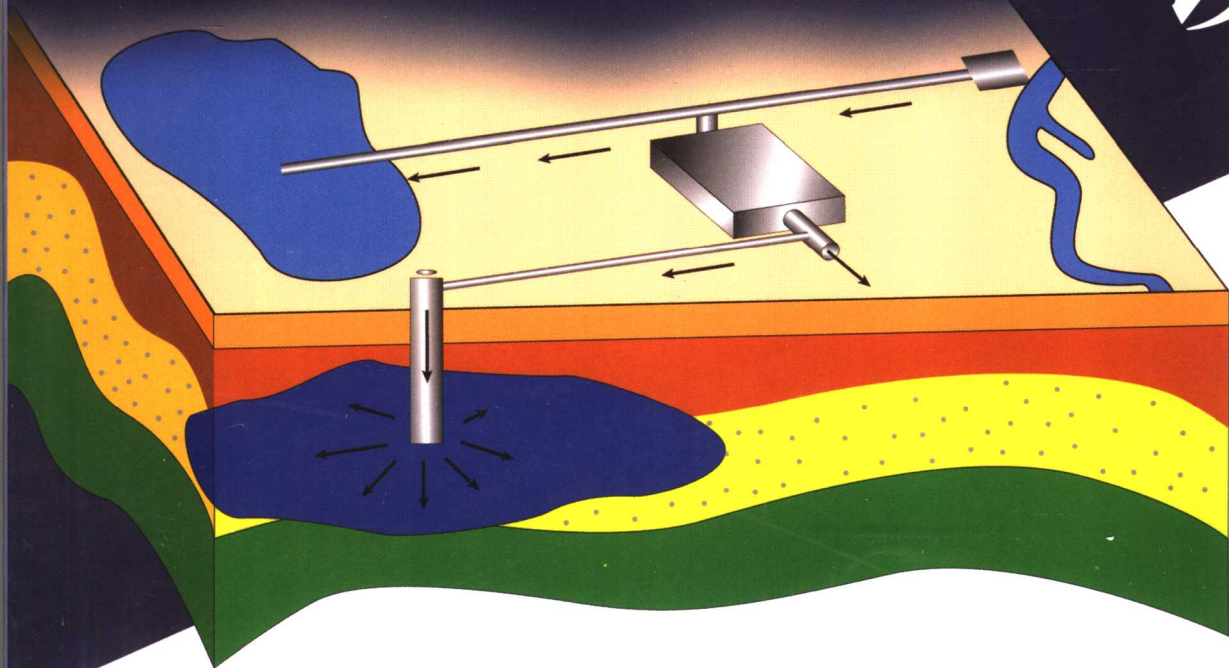


DIXIA SHUIKU
JIANSHE
YANJIU

地下水 水库建设 研究

李砚阁 主编



中国环境科学出版社

本书由南京水利科学研究院出版基金资助出版

地下水库建设研究

李砚阁 主编

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

地下水库建设研究/李砚阁主编. —北京: 中国环境科学出版社, 2007

ISBN 978-7-80209-490-1

I. 地… II. 李… III. 地下水库—水利建设—研究—中国 IV. TV62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 160435 号

责任编辑 周 煜 马琦杰

责任校对 扣志红

封面设计 龙文视觉

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)

网 址: <http://www.cesp.cn>

联系电话: 010-67112765 (总编室)

发行热线: 010-67125803

印 刷 北京中科印刷有限公司

经 销 各地新华书店

版 次 2007 年 4 月第一版

印 次 2007 年 4 月第一次印刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 15.5

字 数 345 千字

定 价 38.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

编委会名单

主 编：李砚阁

副主编：束龙仓 刘玉峰 杜新强 李旺林 颜 勇

编 委：（按姓氏笔画排序）

卞锦宇 杜新强 束龙仓 刘玉峰 李 伟

李亚新 李砚阁 徐澎波 陈海军 黄 菊

耿雷华 崔信民 温忠辉 慕 山 颜 勇

序

无论在人类文明史还是自然演化史中，水资源所发挥的作用都占有极其重要的地位。人类几乎所有文明的起源都离不开地表河流，从长江、黄河、澜沧江到尼罗河、亚马孙河以及幼发拉底河，每一条大河都是人类文明的摇篮；而地下水的开发和利用则标志着人类文明史的一大转折，人类的生活方式开始从逐水草而居的游牧形态向定居耕作发展，极大地拓展了生存与活动的空间。同时，水还是最基本、最活跃的环境要素之一，参与着地球上的物质循环和生态平衡过程，影响着自然环境的兴衰演替。人类对水资源的开发利用以及观察研究，自古以来就从未间断过，但直到进入 20 世纪的后半叶，伴随着科学技术的飞速发展，人类拥有了大规模、高强度地开发和调控地表水以及地下水资源的技术和经济条件，水资源供需矛盾问题也开始显现并且愈演愈烈。水资源短缺、水环境污染以及因水资源开发利用不当造成的环境问题，现在已经成为一场需要全人类共同面对的深刻的社会和环境危机！

无论是现代水文学还是现代水文地质学，均将大气水、地表水与地下水视为一个统一的整体。从系统科学和环境科学的观点，研究在自然条件和人为活动共同作用下的水资源演化规律以及人类活动对区域水文循环的调控作用及其对生态环境的影响，是科学工作者的使命。长期以来，修建地表水库一直是流域水资源调蓄领域中的主流方法，把它作为径流过程中的人工环节，改变水资源的时空分布并使其适应人类的某种需求，它在灌溉、发电、防洪和蓄水方面发挥了巨大的作用；但由地表水库建设和运行所带来的一些负面的生态环境影响（如土壤次生盐碱化、淹没、占地、移民、溃坝、水库淤积等）也日益受到人们的广泛关注。鉴于地表水库在投资成本、蓄水效益以及环境风险等方面的问题，一些发达国家在调蓄水资源方面正逐渐将重点转移到地下水库的建设和运用方面。地下水库是一种有目的、主动地储存、调节和利用水资源的工程措施，与地表水库相比，地下水库具有分布广泛、蓄水效益高、投资少、环境负效应小等明显优势，它在水资源人工调蓄、地表水与地下水联合调度、生态环境地质问题的控制与修复、水资源战略储备以及应（紧）急供水可发挥重要作用。与其相关的理论与实践研究已成为现代水文地质学极为关注的一个热点问题。美国、瑞典、荷兰、德国、日本等许多国家自 20 世纪 80 年代以来便开始大力推广利用地下水库调蓄水资源的做法，并将其视为

水资源管理的重要策略之一。我国目前已在山东、大连等地修建了地下水库并取得了良好效果。但迄今为止,此项工作还仅限于个别地区,在系统的地下水库理论研究方面还处于探索阶段,在地下水库规划、建设、管理、监测等实践方面还未形成实用的指导性工作规范。

《地下水库建设研究》一书,是在水利部科技创新项目《地下水资源规划与利用关键技术研究》(SCX2003-05)的基础上编撰而成,该书运用系统科学的观点,将长期散见于各类学术文献中有关地下水库的观点、认识以及实践经验等加以归纳、综合,以济宁地下水库、大庆西部地下水库以及王河地下水库的规划和建设为具体实例,对相关问题进行了深入研究。对地下水库的概念、功能、分类、分级等基本理论问题进行了系统的阐述,讨论了地下水库系统工程的结构、功能及关键技术问题;分析了我国地下水库建设的区域性规划;在典型区研究中,对地下水库的选址论证、特征水位与特征库容的划分与计算、水资源人工调控计算、地下水人工回灌等方面所涉及到的问题进行了深入、具体的研究。该书初步形成了关于地下水库规划与建设的一套理论体系和方法,提出了一些开创性的见解和观点,对地下水库的一系列理论与实践问题进行了系统的研究和有益的探索。该书的出版必将对我国地下水库理论与实践研究产生重要的推动和促进作用。

水资源短缺是人类在 21 世纪面临的一大挑战,在条件适宜的地区兴建地下水库进行水资源人工调蓄,是科学合理地开发利用大气降水、地表水、地下水,增加可供给水量的有效途径,具有广阔的发展空间。值此《地下水库建设研究》一书出版之际,我谨向作者们表示衷心祝贺,并相信该书的问世,对于我国广大从事水文水资源、地下水科学与工程研究的专业技术人员和在校学生均具有重要的参考、借鉴价值。

中国科学院院士

林子铎

2006 年 10 月 18 日

前 言

历史的长河已经步入了 21 世纪。在科学技术和经济社会迅速发展的同时,资源匮乏的幽灵正在地球上空回荡,水资源的短缺已在世界各地蔓延,我国北方地区水资源明显呈现出入不敷出的景象。水资源是人类的生命资源,是国家基础性的战略资源,地下水资源是其组成部分,是构成并影响生态环境的重要因素。地球上的淡水约 $2/3$ 储存于含水层之中,远多于地表水储存量,但是,地下水交换速度慢,一般情况下,可利用量占其储存量的很少部分。地下水是我国尤其是北方地区主要供水水源。2000 年全国开采地下水 1 069 亿 m^3 (其中深层承压水 250 亿 m^3),地下水供水量占全国总供水量的 19%;北方 16 个省份(不含江苏省)地下水开采量占全国总开采量的 87%,占这些省份总供水量的 38%;在北方的城市生活和工业用水量中地下水所占比例达 60%以上。地下水资源在我国特别是北方地区,在国民经济建设和社会发展以及环境建设方面占有十分重要的地位。近十几年来,地下水资源开发利用水平在不断提高,一些地下水集中开采区已经出现地下水位持续下降、抽空吊泵、地面沉降、地面塌陷、海(咸)水入侵、土地荒漠化等一系列的生态环境问题。

我国地下水开采量居世界第三位,但是地下水人工补给量所占地下水开采量的比例甚小。最近几年,山东和辽宁两省地下水库建设得到了较快的发展,目前已经建成 9 座地下水库,并发挥了效益;我国其它地区地下水库尚未列入水利工程建设议程上来。总的来说,我国地下水库建设工作尚处于起步阶段,很多问题有待于进一步研究。过去,全国地下水的研究工作,主要集中在如何向地下含水层索取更多的水资源,很少考虑如何对其回补和高效利用问题,总的来说,我国地下水库的规划和建设相对滞后。

《地下水资源规划与利用关键技术研究》(SCX2003-05)是水利部科技创新项目,主要任务是在研究人类活动对地下水环境影响的基础上,重点研究地下水库的规划与建设问题。本书是在该项目研究成果的基础上编写而成的。

项目组首先进行了大量的资料检索工作,掌握了国内外相关研究的最新成果和发展趋势;其次,进行了广泛的调研,确定了山东济宁市、吉林西部地区的洮儿河冲积扇和大庆市为典型研究区;在典型区研究的基础上,对地下水库规划、建设的一些关键问题进行了深入研究和探讨。本书系统地总结了国内外地下水库的规划与建设经验,在前人

研究的基础上,总结提出了地下水库的概念、功能和分类;分析研究了我国地下水库区域性分布特征,指出了适宜建设地下水库的地区;提出了地下水库系统结构和各个子系统的功能以及规划与建设中的关键问题;重点研究了人工补给、地下储存和人工调控等关键技术问题;取得了三个典型地区的研究成果。

关于地下水库理论研究、规划与建设技术等方面,目前尚没有成熟的理论与方法,虽然本书对地下水库进行了系统的研究,但是,难免存在这样或那样的缺点,期盼与同行共同探讨,并希望起到抛砖引玉的作用。

本书编写得到许多专家和学者的热心支持,并得到我国著名水文地质学家林学钰院士的悉心指导,在此一并表示感谢!

作 者
2006年5月

目 录

第一章 地下水库概述	1
第一节 地下水库的国内外研究概况	1
一、问题的提出	1
二、水资源地下储存与调蓄的发展历程	3
三、我国地下水库研究中存在的问题	11
四、地下水库在中国的发展前景	12
第二节 地下水库的概念	14
一、关于地下水库的代表性观点	14
二、地下水库的本质特征	15
三、地下水库概念	16
四、地下水库与相近概念辨析	17
第三节 地下水库的功能与特点	20
一、地下水库的功能	20
二、地下水库的特点	20
第四节 地下水库的分类	21
一、现有分类方案	22
二、分类方案的探讨	23
第二章 我国地下水库规划的区域性分析	35
第一节 我国地下水超采状况	35
一、地下水超采区的含义	35
二、我国地下水超采区概述	36
三、地下水超采引起的环境问题	38
第二节 我国地下水类型与地下水库建设的区域性分析	41
一、第四系松散岩类孔隙水	42
二、基岩裂隙水	44
三、碳酸盐岩裂隙溶洞水	44
四、多年冻土区冻结层上水	44
第三节 浅层地下水的恢复功能与地下水库建设研究	45
一、易恢复区	47
二、较易恢复区	47
三、不易恢复区	48
四、较难恢复区	49
五、极难恢复区	51

第三章 地下水库规划与建设的关键问题研究.....	52
第一节 建设地下水库必要性.....	52
一、与地表水库相比, 地下水库具有自己独特的优点.....	52
二、建设地下水库是战略要求.....	53
三、地下水储存空间和储存数量大于地表水.....	53
四、建设地下水库是地下水资源规划与管理的需要.....	53
五、地下水库建设可以弥补地表水库的不足.....	54
第二节 地下水库的基本结构及功能.....	54
一、地下水库的系统结构.....	55
二、各子系统的功能.....	55
第三节 地下水库补给水源子系统.....	56
一、水源.....	56
二、补给水源的论证.....	57
三、补给水源的输送设施.....	57
四、水质要求与简易净化工程.....	58
第四节 地下水库储存子系统.....	59
一、地下水库的库区普查.....	59
二、确定地下水库库区范围的方法.....	61
三、地下坝建设.....	65
四、地下水库库容计算与分级.....	65
第五节 地下水库补给区子系统.....	68
一、补给区建设应考虑的主要问题.....	68
二、补给区的构成.....	69
三、补给区建设的几种方法.....	69
第六节 地下水库排水子系统.....	72
一、地表水排泄工程.....	72
二、地下水排泄工程.....	73
第七节 地下水库监测子系统.....	74
一、监测内容.....	74
二、建设目标.....	74
三、建设原则.....	74
四、系统总体框架.....	75
五、系统功能结构.....	75
六、硬件框架.....	75
第八节 地下水库管理运行子系统.....	77
一、地下水库的管理.....	77
二、地下水库的调度.....	78
第九节 地下防渗技术研究.....	90
一、防渗方案.....	90
二、防渗处理方法.....	92
三、其它.....	104

第四章 济宁市地下水库规划与建设研究	105
第一节 济宁市地下水的开发利用.....	105
一、地下水开发利用现状	105
二、地下水超采现状分析	107
第二节 地下水库特征参数分析.....	108
一、地下水库特征参数分析	108
二、地下水库实体模型	113
第三节 补给区和补给源的分析研究.....	115
一、补给区的确定	115
二、补给水源分析	117
第四节 补给方法研究.....	119
一、计算原理方法	120
二、数据处理	121
三、结果分析	122
第五节 地下水人工回灌方案分析.....	125
一、人工回灌调蓄方案设计	125
二、不同回灌方案下水位预测及均衡分析.....	127
三、不同方案回灌效果综合比较	138
第六节 地下水库库容不确定性分析.....	140
一、不确定性因素及蒙特卡罗方法.....	140
二、计算方法	141
三、计算结果	142
第五章 大庆市地下水库建设研究	146
第一节 研究区概况.....	146
一、地理位置及交通	146
二、地形地貌	147
三、气象水文	147
四、社会经济概况	148
第二节 区域地质与水文地质条件.....	149
一、区域地质条件	149
二、区域水文地质条件	153
第三节 水资源开发利用现状与环境地质问题.....	159
一、地表水开发利用现状	159
二、地下水开发利用现状	162
三、区域性地下水位降落漏斗	163
四、环境地质问题及防治对策	165
第四节 大庆市西部地下水库库区选址.....	167
一、地下水库库区选址的一般原则.....	167
二、大庆市西部地下水库库区选址.....	168
第五节 地下水库库区地下水数值模型的建立.....	173

一、水文地质概念模型	173
二、数学模型的建立及求解	177
三、模型的识别及验证	181
四、库区地下水均衡分析	183
第六节 大庆地下水库人工调蓄控制水位与库容的确定	184
一、潜水含水层地下水人工调蓄特征水位的确定原则	184
二、深层承压含水层地下水人工调蓄特征水位的确定原则	186
三、大庆西部地下水库死水位的确定	188
四、地下水水质恶化临界水位	188
五、大庆西部地下水库正常蓄水位的确定	192
六、大庆西部地下水库特征库容计算	193
第七节 地下水库水量调蓄方案分析	196
一、以恢复地下水库水位为目标的水量调蓄方案	196
二、地下水库应急供水能力	202
第八节 地下水人工补给对地下水环境的影响	205
一、人工补给对注入水源水质的一般要求	205
二、人工补给过程中的地球化学反应研究	208
三、研究的局限性	218
第六章 王河地下水库工程建设	220
第一节 概况	220
第二节 王河地下水库的设计方案	221
第三节 地下水库建库条件分析	222
一、建造地下水库的基本条件	222
二、工程地质与水文地质概况	223
三、王河地下水库建库条件分析	223
第四节 工程规划	225
一、地下水库静态调节计算	225
二、地下水库初步规划	226
三、地下水库动态调节计算	226
四、地下水库工程规模的确定	229
五、工程规划	229
第五节 工程设计	230
一、地下坝工程设计	230
二、回灌工程设计	232
三、开采工程设计	234
四、工程监测设计	234
第六节 工程效益	235
本章小结	235
参考文献	236

第一章 地下水库概述

第一节 地下水库的国内外研究概况

一、问题的提出

(一) 水资源特性

从广义上讲, 水资源是指地球上所有水体, 本书中所指的水资源是陆地上可以利用的淡水资源, 它包括江河、湖泊、泉、积雪、冰川、大气水、土壤水以及地下水等可供长期利用的水源。1977 年, 联合国教科文组织 (UNESCO) 提出了水资源的含义: “水资源是指可以利用或有可能被利用的水源, 这种水源应当有足够的数量和可用的质量, 并在某一地点满足某种用途而得以利用”。

水资源是工农业生产以及人类生活中不可替代的最为重要的自然资源之一。随着社会经济的发展, 水资源供需矛盾问题愈演愈烈, 1977 年联合国向全世界发出警告: “水不久将成为一项严重的社会危机”。水资源供需矛盾产生的原因之一, 主要是自然状态下水资源的某些特性与人类的需求不相适应。因此, 要充分利用, 合理开发水资源, 首先应了解水资源的特性。水资源的特性概括起来有以下几点:

1. 时空分布不均匀性

依照水文循环的周期性, 从多年或长期的观点来看, 地球上水量大体上是平衡的, 但由于影响水文循环的因素很多, 变化复杂, 降水量的地区分布很不均匀, 且年内年际变化很大, 在局部地区, 特定时间段内水量是有限的。

2. 水利水害两重性

水资源既可为国民经济建设服务, 也会带来灾害。例如, 在地表河流上兴建水利工程, 一方面可以用于兴利 (灌溉、发电、给水等) 和防洪, 但也会引起库区农田、森林、矿藏淹没和人口迁移等不利影响; 而开发利用地下水不当, 则可能引起地面沉降、塌陷、次生盐碱化等一系列环境水文地质问题。

3. 随机性和不确定性

由于大气物理状态变化极端复杂, 降水量、河川径流不论是年内或年际间的变化都

很大，变化的趋势通常也难以确定预测。这种自然情况给水利工程的合理设计和建成后的运行，都带来一定的困难。

4. 地区性和整体性

所谓地区性是指，一方面，水资源的蕴藏量及其分布情况和变化特性常因地区自然条件不同而不同；另一方面，水资源的开发和河流治理方式的重点，也因地区自然条件和社会经济情况的不同而各有差别。所谓整体性，是指某一地区的水资源总是处于区域水文循环之中的一个有机组成部分，牵一发而动全身。因此，水资源问题，无论是水量、水质，或是防洪、兴利，都具有上下游、左右岸，各地区、各部门之间的相互影响极为错综复杂的关系。

由于水资源的上述特点，因此为了进行有效的开发利用，一个重要的手段就是对地表水和地下水资源实施人工控制或人工调节。

(二) 地表水库

修建地表水库一直是水资源调蓄领域中的主流方法，可用于防洪、供水、发电以及灌溉等目的。根据国际大坝委员会（ICOLD）1998 年对世界大型水库（坝高超过 15 m，以及坝高为 5~15 m，库容在 300 万 m³ 以上）的统计资料，全球水库总库容约为 6 464 km³，其中中国大型水库为 1 851 座，总库容为 649 km³，美洲、北欧和中国共占世界现有水库总库容的 70%（表 1-1）。考虑到未收入该统计中的大坝总数和坝高不到 5 m 的数量，全世界水库总库容的估计值为 6 845 km³（折合 68 450 亿 m³）。

表 1-1 全球水库总库容的分布情况

地 区	大坝数量	总库容/km ³	占全球总库容比例/%	平均库容/km ³
北 美	7 205	1 845	29	256
南 美	1 498	1 039	16	694
北 欧	2 277	938	15	412
南 欧	3 220	145	2	45
非洲次撒哈拉	966	575	9	595
北 非	280	183	3	652
中 国	1 851	649	10	351
南 亚	4 131	319	5	77
中 亚	44	148	2	3 364
东南亚	277	117	2	424
太平洋沿岸	2 778	277	4	100
中 东	895	224	3	250
全球累计	25 422	6 464	100	254

以美国为例，近百年来美国西部地区兴建的水利工程不胜枚举。据负责美国西部 17 个州水资源开发的美国内政部灌溉局提供的数字，1902 年以来，该局共在西部领导建设了包括胡佛水坝、大古力水坝等在内的 600 多个水坝和水库，解决了 3 100 万人的用水问题，为西部 404.7 万 hm² 农田提供了灌溉水，这些农田生产的蔬菜目前在全美蔬菜总产量中占到 60%。更重要的是，水利建设为美国西部的大开发和大发展提供了助推力。兴

修水利使这一地区的很多干旱、半干旱土地变成了良田, 农业获得飞速发展。水资源短缺问题的解决, 也为美化环境、城市建设以及工业、尖端高技术产业、娱乐和服务业等的腾飞创造了有利条件。

不可否认, 地表水库带来了巨大的社会经济效益, 但修建地表水库所带来的环境与社会的影响也越来越受到人们的关注。总的来说, 地表水库的主要弊端和问题有:

1. 地表水库主要弊端

(1) 建库的环境和经济成本高: 大型地表水库往往伴随着土地淹没、占地和移民问题, 这些问题不仅改变了区域环境, 且由此引发的赔偿费用常是十分高昂的;

(2) 建库风险大: 大型地表水库可能诱发地震或产生溃坝等风险, 一旦这些风险发生, 对人民生命财产将造成重大损失;

(3) 水库运行的环境负效应多: 库区蓄水往往抬高了地下水位, 可能造成下游土壤盐渍化等问题。

2. 质疑的主要问题

除了代价高昂外, 地表水库调蓄水资源的效果也正受到质疑:

(1) 蒸发损失大: 水库蒸发量大, 尤其是中小型地表水库水面蒸发消耗达到其库容量的 20%~30%。

(2) 贮水周期短: 由于防洪等原因, 与同等规模的地下水库相比, 地表水库储水周期短, 尤其是中小型地表水库蓄水周期很少超过一年, 也就是说, 中小型地表水库往往不能抵御一年以上的干旱。

(3) 实际蓄水量不高: 由于淤积问题, 全球地表水库每年将损失总库容的 0.5%~1%, 若维持现有的总库容, 每年需要新建 300~400 座坝。IWMI(International Water Management Institute) 2000 年评估认为, 由于水库淤积和缺少地表水源的补充, 全球大型地表水库的实际蓄水量不足其设计蓄水量的 50%。

一方面, 鉴于地表水库所存在的不足, 世界上一些国家已经放弃了修建大型地表水库来储备水资源的做法, 甚至考虑拆除一些环境负效应显著的地表水库。另一方面, 利用含水层广阔空间储存和调蓄水资源的国家和地区越来越多。但是, 由于地下水库调蓄水过程缓慢, 功能相对单一, 不能完全替代地表水库的功能, 因此, 利用地表水库发电、防洪与调蓄水资源, 仍有必要; 与此同时, 有必要大力发展地下水库, 进行水资源的地下储存与调蓄。

二、水资源地下储存与调蓄的发展历程

利用地下储存空间来储存水资源并非是一种新概念, 世界各国在这个方面都有所实践。但是, 系统地研究地下水库规划与建设问题, 目前尚不多见。地下储存水资源技术的发展历程, 大体上可以划分为三个阶段。

（一）无意识阶段（19 世纪末期以前）

从人类开始有意识地利用地表水资源进行灌溉、拦截河水和积蓄雨水的时候，无意识的水资源地下储存就开始了。例如：1860 年巴基斯坦开始修建了印度河流域巨大的灌溉系统，大量地表水流经灌溉网渠渗入地下。据 1965 年估计，每年可从灌渠渗入地下的水有 170 亿 m^3 ，而天然补给的只有 80 亿 m^3 。这样，在灌区下面 30 m 深度内至少储存了约 4 000 亿 m^3 水。埃及的阿斯旺大坝建成后，每年有若干亿立方米水从水库下渗到西部沙漠中的地下砂岩含水层中，形成了撒哈拉沙漠最大的地下储水区。

（二）主动调蓄阶段（19 世纪末期至 20 世纪 60 年代）

19 世纪末期，伴随着水资源消耗量的持续增大，以及地下水资源的广泛开发，产生了一系列的环境水文地质问题，其中过量开采而引起的地面沉降和海水入侵问题受到极大重视，地下水人工补给被明确地提出来，人们开始对含水层进行直接补给的有效途径进行研究。

在美国，1889 年就开始进行地下水人工补给的研究和实践，但这项研究被引起足够重视则在 20 世纪 30 年代。纽约东部的长岛地区为了满足空调系统的需要，大量开采低温地下水，致使区域地下水位下降到海平面以下，导致水资源枯竭和海水入侵，引起政府关注并于 1933 年通过一项决议，要求以空调用水为目的抽取地下水的同时，必须通过注水井或渗透池对地下水进行人工补给。与此同时，加利福尼亚州开始通过渗透池利用雨水对冲积平原含水层进行人工补给，并在 30 年代得到推广。加州于 1951 年开始研究在滨海地区进行人工补给以阻止海水入侵的问题，首先在曼哈顿海滨平行海岸线成排地钻了 9 个直径为 30.5 cm、间距为 152 m 的补给井，1953 年开始用处理过的科罗拉多河水向井中补给，取得了宝贵的经验。到 1955 年，加州每天的地下水人工补给量达到 1.42 万 m^3 ，占美国人工补给总水量的一半以上。

与国外相比，我国利用含水层进行地下水人工补给研究的起步较晚。20 世纪 50 年代末，上海一些工厂采用废弃深井回灌的方法增加附近深井的出水量。1963 年起上海市广泛开展了人工补给地下水的试验研究工作，有效控制了地面沉降。在实际回灌中，总结出了采取定期回扬的办法及时清除回灌井中的暂时性堵塞的经验。北京、天津、陕西以及浙江也相继在这一时期开展了一系列地下水人工补给的实践，研究内容涉及人工补给方法、回灌水源的水质要求及处理方法、回灌管井设计与布设、管井回灌的技术方法等。

这些实践是在最初的地下水人工补给的应用领域，但是，已经进入了有意识、有目的主动调蓄、弥补水资源过量开采的阶段。

（三）调蓄发展阶段（20 世纪 70 年代至今）

20 世纪 60 年代后期，地下水人工补给引起了更为广泛的关注，世界各国在长期的地下水人工补给实践中，拓展了其服务领域和功能，使地下水人工补给不再仅仅在地下水超采区进行，而是逐渐将地下水人工补给、地下储水和地下水的开发利用有机结合起来，发展了利用含水层进行水资源人工调蓄的方法，即在丰水季节或用水量少的时期，将多余的地表水体（包括处理达标的废水）采用地下水人工补给技术引入地下，储存在

含水层中，等到枯水期或用水高峰时再开采出来，同时腾空了地下含水层，为下一次人工补给创造了条件。这样便形成了一种以含水层为主体的水资源人工调蓄系统，鉴于这种调蓄技术已超出了地下水人工补给的定义范畴，在水资源的调蓄方面发挥了与地表水库基本相同的功能，我们称其为地下水库。但由于地域和习惯等方面的差别，目前各国对这种水资源地下人工调蓄系统在称谓上存在着较大的差异，主要有以下四种：

1. 地下水人工补给 (Artificial Recharge, AR)

由于地下水库是在地下水人工补给基础上发展起来的，而地下水人工补给通常是地下水库能否充分发挥效益的关键，是地下水与地表水联合调度的纽带，在整个地下水库研究中占据着最为重要的地位，因此，世界上有许多无坝地下水库都沿用着地下水人工补给的称呼。但值得注意的是，并非所有的地下水人工补给工程都与我们所说的地下水库的内涵一致，只有那些将人工补给—地下储存—人工开采有机结合在一起形成的水资源地下人工调蓄系统，才能发挥我们所指的地下水库的功能。

美国奥伦奇市 (Orange) 在 1956 年开始利用当地有利的地形和地质条件，将当年剩余的水资源和处理过的达标污水，采用河道、人工湖以及竖井等技术回灌到地下，储存在近地表的含水层中，以便于在干旱或缺水季节抽取利用。这样不仅有效遏制了海水入侵，而且在水资源的储存上，避免了无效蒸发，实现了水资源的年内和多年调蓄，保证了水资源的稳定供给，地下水价也只有地面调水的 $1/3$ 。这个实例常作为地下水人工补给的成功典型，但水资源年内和多年调蓄功能的实现并不是由地下水人工补给单独完成的，而是以适度规模的含水层为基础，在与排水工程相互配合下共同完成的。

沙特阿拉伯在 20 世纪后半期实施了“人工蓄水池补给管理计划”，在间歇性干河谷中修建了 200 多个坝，将洪水拦截蓄积，补给下伏的洪积含水层，这是世界上专为人工补水目的而修建水坝的典型实例之一。

以色列在地下水人工补给方面以渗透池为主，每年在洪水期将水蓄积到地表水库之类的蓄水池内，使水中固态颗粒物质沉淀，然后将这些水输送到面积约 40 hm^2 的渗透池中，水渗入地下由砂岩和灰岩组成的两个含水层中，每年可贮存约 2 亿 m^3 地下水。到夏天用水高峰时，再从距渗透池 $100 \sim 500 \text{ m}$ 的地方挖井，抽取地下水来使用。

利比亚是一个半干旱地区，年均降水量 200 mm ，分布不均匀，地表水通过一些主要的季节性河流排泄入海，而在干旱季节，缺水问题又格外严重。20 世纪 70 年代地下水的大量开采，使该地区面临海水入侵的危险。为了进行地下水与地表水的综合利用，利比亚政府在霍姆斯以东约 40 km 的沿海地区修建了一座地表水库用于控制瓦地卡阿姆河水，储存丰水季节（年份）的水流，一部分用于灌溉，另一部分引入地下储存，供干旱季节（年份）使用；地下含水层主要起调节作用，储水介质是岩溶化石灰岩，储水层空间大约 1000 万 m^3 。

荷兰把水安全提到非常重要的位置，时刻预防着洪灾、旱灾、污染乃至恐怖事件的发生，为此准备了充足的备用水源。比如，首都阿姆斯特丹供水公司就准备了地表水库备用水源、河道储存备用水源和地下水库备用水源。其中，地表水库备用水源可维持一周供水，河道储存备用水源可维持二周供水，而地下水库备用水源却可维持长期供水，以应对水源污染等突发、恐怖事件的发生。荷兰非常重视地下水与地表水的转化，特别